

連続繊維緊張材の引張特性 に与える寸法効果の影響

酒井博士¹・濱田 譲²・林田充弘³・服部篤史⁴・宮川豊章⁵

¹正会員 (株)ピー・エス 開発技術第一部 主任研究員(〒 170-0004 東京都豊島区北大塚 1-13-17)

²正会員 工修 ドービー建設工業(株)技術センター 主任研究員(〒 170-0004 東京都豊島区北大塚 1-16-6)

³正会員 建設省 道路局 有料道路課 技術第二係長(〒 100-8944 東京都千代田区霞が関 2-1-3)

⁴正会員 工修 京都大学 大学院工学研究科 助手(〒 606- 8501 京都市左京区吉田本町)

⁵フェロー会員 工博 京都大学 大学院工学研究科 教授(〒 606- 8501 京都市左京区吉田本町)

連続繊維緊張材のような脆性材料の引張特性は、金属材料に代表される延性材料に比べてそのばらつきが大きく、かつ供試体の体積、すなわち寸法に依存するといわれているが、このような点に着目した研究はほとんど行われていないのが現状である。

そこで、本研究は引張特性の寸法依存性に着目し、供試体の母材長が引張特性に与える影響について実験的に検討した。母材長に関するパラメータは、標準的な引張試験に用いられる長さのものから、実際にプレストレストコンクリート構造物の緊張材に適用される数十メートルの長さまで数種類を設定し、引張試験を実施した。その結果、供試体の母材が長くなるにしたがい、引張耐力や終局ひずみ小さくなる事が判明した。

Key Words : FRP tendons , brittle materials , size effect , specimen length , tensile properties , Weibull distribution

1. はじめに

連続繊維緊張材は、一般の鋼材に比べて高耐食性や軽量および高強度など多くの特徴を有しており、PC 鋼材の代替材料として様々なコンクリート構造物への活用が期待されている。中でも、プレストレストコンクリート橋梁で最近注目を浴びている外ケーブル工法への適用は、連続繊維緊張材の材料特性を十分に生かした手法として、さらに工法の有効性を高めるべく研究が進められている¹⁾。連続繊維棒材をこのような緊張材として用いる場合には、PC 鋼材とは異なった、連続繊維緊張材特有の引張特性を明らかにし、それをもとにして設計に用いる特性値を設定することが、きわめて重要な事項である。

連続繊維緊張材が PC 鋼材と相異なる特徴のひとつに、破壊形態が挙げられる。一般に、PC 鋼材のような金属材料は、降伏から破断に至る過程で大きな塑性変形を伴い延性破壊するのに対し、連続繊維緊

張材のような複合材料は、塑性変形を伴わないで脆性破壊する。材料強度の代表である引張耐力は、製造過程で材料内部に生じている本来避けることのできないき裂等の欠陥の強度に支配されることが知られている。延性材料の場合は、塑性変形によって欠陥に起因した局所的な応力が分散し、引張耐力は個々の欠陥の強度の平均値として現れることから、変動が小さい。一方脆性材料の場合、塑性変形を伴わないことから、引張耐力は最も弱い欠陥の強度として現れる最弱リンクモデルに従うと考えられ、変動が大きいといわれている²⁾。したがって、脆性材料である連続繊維緊張材においても、引張試験により得られる引張耐力は、母材に分布する引張耐力の最小値を評価していることになる。そして、引張耐力が最弱リンク概念に従うとすると、寸法依存性を示すことになる³⁾。すなわち、供試体の母材が長くなるにしたがい、より大きな欠陥の存在する確率が高くなり、その結果引張耐力が低下することが予想される。

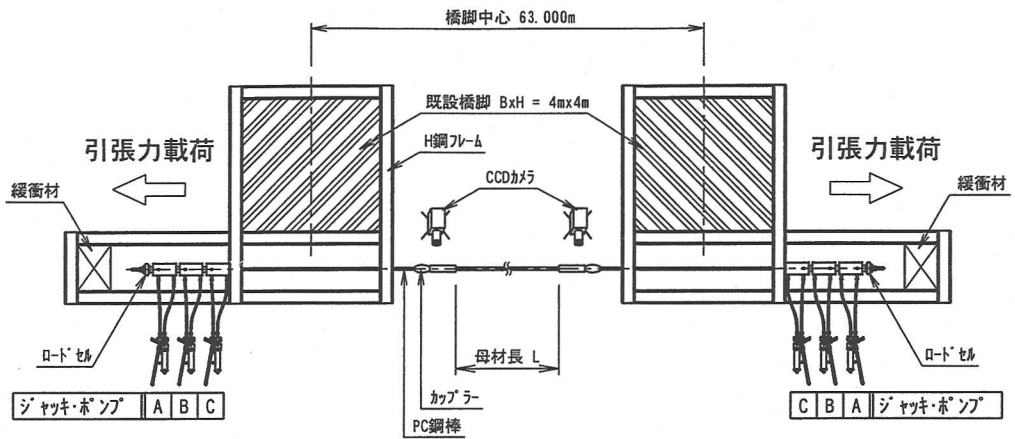


図-1 長さ効果引張試験装置図

しかし JSCE-E531-1995(連続繊維補強材の引張試験方法(案))⁹⁾では、引張耐力の特性値を定める試験方法として、供試体の母材長を 100mm 以上かつ公称径の 40 倍以上、およびより線状ではよりピッチの 2 倍以上と規定しており、専用の試験機を用いた引張試験を想定した母材長としている。それに対し、プレレストコンクリート構造物に実際に適用される緊張材の長さは、一般に数十メートルにもおよぶことから、引張試験に用いられる供試体の母材長と、実際の構造物に適用される母材長では大幅に異なる場合がほとんどである。したがって、連続繊維緊張材の耐力の特性値を定めるにあたっては、寸法効果の一つである‘母材長’の影響を適切に考慮する必要がある。

そこで本研究は、連続繊維棒材をプレレストコンクリート構造物の緊張材として適用することを想定し、引張耐力や終局ひずみの特性値を定めるにあたり、寸法効果の一つである供試体の母材長がこれらの引張特性に与える影響について検討した。

2. 長さ効果引張試験概要

(1) 連続繊維緊張材諸元

本試験用いた連続繊維緊張材は、炭素系、アラミド系(以下、それぞれ CFRP、AFRP と略称する)各 1 種類であり、その主要諸元を表-1に、外観を写真-1に示す。なお、引張耐力の規格値は、連続繊維緊張材製造メーカーが独自に定めた値である。

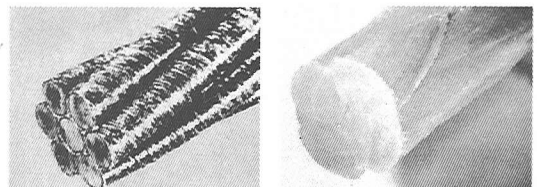
(2) 長さ効果引張試験

a) 試験装置

引張試験は、JSCE-E531-1995(連続繊維補強材の

表-1 連続繊維緊張材の諸元

緊張材	CFRP	AFRP
連続繊維材	PAN系	バラ系
繊維結合材	エポキシ系樹脂	
形状	より線状	組み紐状
よりピッチ (cm)	15.0 ~ 16.0	—
呼称 (mm)	φ 12.5	φ 14.7
公称径 (mm)	φ 11.4	φ 15.6
公称断面積 (mm ²)	102.8	192.2
公称単位重量 (g/m)	151	243.1
繊維特性	引張強度 (N/mm ²)	3630
	弾性係数 (N/mm ²)	2.35 × 10 ⁵
軸方向繊維体積混入率 (%)	64	66
引張耐力規格値 (kN)	142	235



a.CFRP

b.AFRP

写真-1 供試体外観

引張試験方法(案))によれば、JIS B 7721-1991(引張試験機)に適合した引張試験機で行うことが規定されている。しかし、本試験の場合は供試体の母材が長く、このような試験機が適用できないため、図-1に示すように既設橋脚を反力体として、PC鋼材緊張用ジャッキにより引張力を载荷する特殊な試験装置を用いて、屋外で試験を行った。試験状況を写真-2に示す。本論文では、この装置を用いて行った引張試験を『長さ効果引張試験』とし、JSCE-E531-1995(連続繊維補強材の引張試験方法(案))に規定される仕様

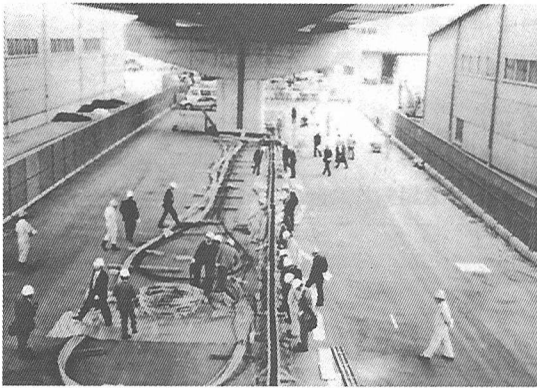


写真-2 長さ効果引張試験状況

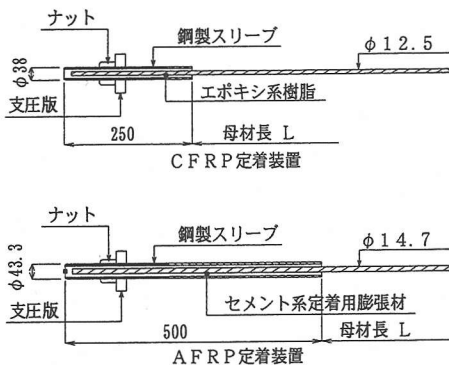


図-2 定着装置図 (単位:mm)

の引張試験機で行われた引張試験を『標準引張試験』として両者を区別することとした。

b) 供試体諸元

長さ効果引張試験に用いた供試体の母材長は、1.0m, 12.5m, 25.0m および 50.0m の 4 水準とし、供試体数は各 15 体とした。また、供試体の両端に取り付けられた付着型定着装置と母材長の定義を図-2に示す。なお、長さ効果引張試験において母材長 1.0m を実施するのは、標準引張試験結果と比較することで、試験装置の性能を確認するためである。

c) 試験条件

- ・ 試験温度：本研究に適用した連続繊維緊張材の引張特性は、常温下においては温度の影響をほとんど受けないことが報告されている⁹⁾。したがって、本試験では特に試験温度の制御は行わず、15 ~ 20 °C 程度の雰囲気温度で行った。
- ・ サグの影響：母材が長い供試体では、サグが引張特性に及ぼす影響が考えられる。しかし、連続繊維緊張材の単位重量は表-1に示すように PC 鋼材と比べて非常に小さく、母材長 50.0m の供試体でも引張力が引張耐力規格値の場合、サグは計算上 3mm 程

度しか生じないことから、その影響は無視できると考えられる。したがって、供試体の母材部を中間で支持することなく引張試験を行った。また、両橋脚に接続される PC 鋼棒は、長さをほぼ同一とすることで、PC 鋼棒のサグが供試体に及ぼす影響を極力小さくした。

d) 試験方法

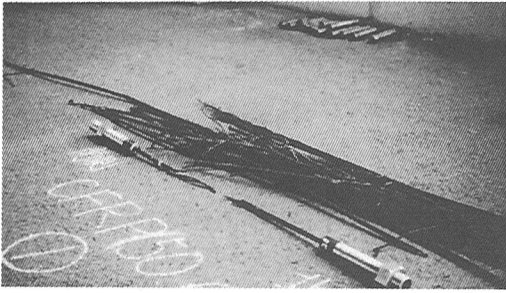
- ・ 計測項目：計測項目は荷重とひずみの 2 種類とし、前者はジャッキ背面に取り付けられたロードセルで、後者はひずみゲージと伸び計を併用した。ひずみは、母材中央部と片側定着部近傍の各 2 断面にそれぞれ対角に計 4 箇所、長さ 2.0mm のゲージを繊維方向に貼付した。また伸び計は、CCD カメラにより供試体両端の定着装置の移動量を計るもので、精度面を考慮して母材長 12.5m 以上に適用した。ひずみ計測に 2 つの手法を併用したのは、ひずみゲージで得られる局部的なひずみと、伸び計で得られる母材全体の平均ひずみを比較するためである。
- ・ 荷重方法：荷重速度は毎分 100 ~ 500N/mm² の割合で荷重するものとし、荷重荷重約 20kN ごとにロードセル、ひずみ計および伸び計の値を記録した。
- ・ 供試体保管：試験開始前に試験場へ一括搬入された供試体は、ビニールシートで完全に覆い、長さ効果引張試験完了まで最長で約 1 ヶ月間試験場で保管した。

3. 実験結果および考察

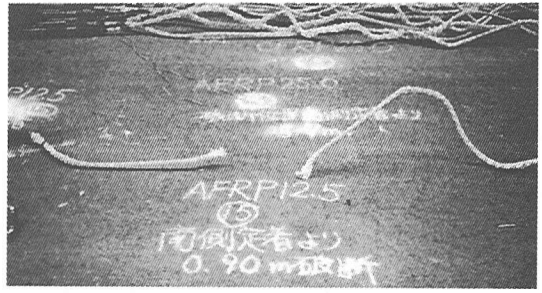
(1) 破壊状況

CFRP, AFRP とともに、いずれの母材長の供試体も荷重とひずみの関係は終局までほぼ直線を保ったまま、爆裂音とともに急激に引張耐力を失って破壊した。なお、引張試験中は供試体飛散防止用防護材を施しているため、破壊の瞬間を目視では確認できなかった。ただし、引張試験終了後の供試体から、破壊状況は以下のものであった。

- ・ AFRP, CFRP とともに母材が破断することで破壊しており、定着装置スリーブの異常な変形やスリーブからの連続繊維緊張材の抜けだし等は確認されなかった。したがって、試験で得られた引張耐力は、母材部のそれとみなすことができる。
- ・ CFRP は、母材の破断とともに、その反動による母材の跳ね返りにより、長さ数メートル程度の小片に破碎した。ただし、最初に生じた破断位置や破断箇所数等は確認できなかった。供試体の小片を集積したものを写真3-aに示す。
- ・ AFRP は、一断面で破断が生じるとともに、写真3-bに



a.CFRP



b.AFRP

写真-3 破壊状況

示すように、その反動で長さ数メートルごとに組み紐がほどけ、折れた状態となった。母材の破断位置を、定着体近傍と一般部(定着体から 1m 以上離れた部位)に分ければ、母材長 12.5m では前者が多く見られたのに対し、25.0m では両者が同程度混在し、50.0m では後者が多く見られた。

(2) 引張耐力

試験で得られた引張耐力の最大、最小および平均値を表-2に示す。また図-3は、引張耐力のヒストグラムを示したものであるが、後述するワイブル確率密度関数もあわせて示している。ただし、標準引張試験は、筆者らが行った既往の実験結果⁶⁾であり、母材長は CFRP,AFRP それぞれ 1.0m および 0.6m である。また、長さ効果引張試験では供試体数 15 以下のものがあるが、これは破壊時の衝撃による計測機器の損傷によりデータの採取ができなかった供試体があったためである。

これらによれば、標準引張試験と長さ効果引張試験の L=1.0m を平均値で比較した場合、CFRP は同一の母材長にもかかわらず 5%、AFRP では 8%小さく(ただし、AFRP の母材長は両試験では若干異なっており、わずかではあるが寸法効果の影響が含まれていると考えられる)なっている。また、長さ効果引張試験 L=1.0m のヒストグラムは、離散的でばらつきが大きく、他の結果と異なった傾向を示している。これらの原因は、長さ効果引張試験では母材が短いために、両側定着体の軸心が必ずしも完全に一致しておらず、定着装置近傍の母材が曲げの影響を受けたためと推定される。本試験と同じ連続繊維緊張材を用いた研究でも、AFRP はこのような傾向が顕著に表れることが報告されている⁷⁾。一方、長さ効果引張試験の母材長 12.5m 以上では、母材が十分に長いためにこのような影響は小さく、本試験装置は性能的に問題ないと考えられる。

引張耐力の平均値を標準引張試験と比較した場

表-2 引張耐力一覧 (単位:kN)

試験の種類		標準引張試験	長さ効果引張試験				
母材長 L(m)		※	1.0	12.5	25.0	50.0	
C	供試体数	100	14	14	15	13	
F	引張耐力	最小	144.6	141.8	134.5	128.2	127.6
R		平均	167.9	159.7	144.3	144.9	141.8
P		最大	184.6	171.7	151.7	155.2	150.8
A	供試体数	98	12	14	15	13	
F	引張耐力	最小	246.9	227.1	215.2	213.0	206.5
R		平均	266.8	245.5	231.4	232.2	225.1
P		最大	282.5	279.2	249.1	249.5	235.8

※注) CFRP:L=1.0m AFRP:L=0.6m

合、母材が長くなるにしたがって引張耐力が小さくなる傾向がはっきりと現れており、CFRP,AFRP とともに、母材長 50.0m では 15%程度小さくなる。

一般に、連続繊維緊張材のような脆性材料の引張耐力は、ワイブル分布への適合性がよいことが知られている。筆者らも、標準引張試験結果の分布形状について、確率紙や χ^2 検定およびKS検定などにより、正規分布と2母数ワイブル分布(以下、単にワイブル分布という)の適用性を比較検討し、わずかではあるがワイブル分布への適合性がよいことを確認した⁶⁾。

ワイブル分布の確率分布関数を、式(1)に示す。

$$F(x) = 1 - \exp \{ - (x/\alpha)^m \} \quad (1)$$

ここに、 $F(x)$: 確率分布関数、 α : 尺度母数、 m : 形状母数、

式(1)を変形し、両辺の二重対数をとれば、

$$\ln \ln [1 / \{ 1 - F(x) \}] = m \cdot \ln(x) - m \cdot \ln(\alpha) \quad (2)$$

となり、式(1)は $\ln \ln [1 / \{ 1 - F(x) \}] \sim \ln(x)$ 座標軸上で

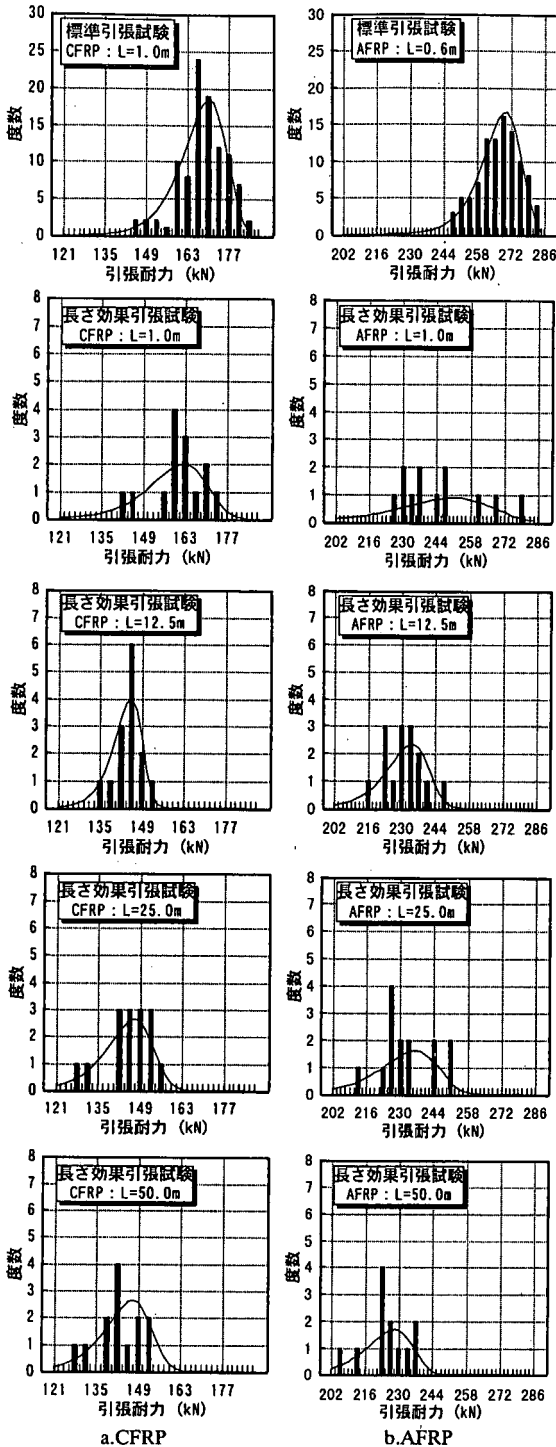


図-3 引張耐力分布図

直線となる。各母材長ごとにこの関係をワイブル確率紙にプロットし図-4に示す。なお、 $F(x)$ は平均ランク法で算出した破壊確率である。これによれば、CFRPおよびAFRPともにいずれも直線性が良好で、各母材長ごとにワイブル分布への適合性がよいが、その分布

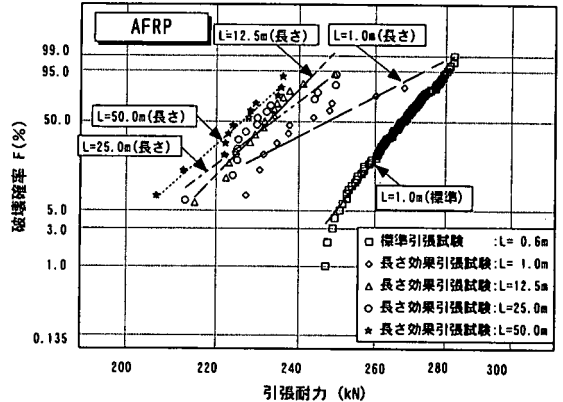
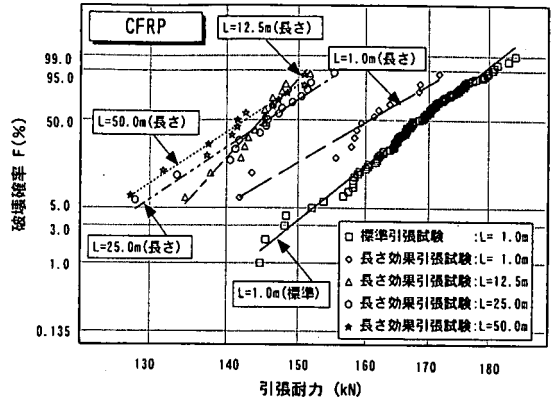


図-4 引張耐力のワイブル確率紙へのプロット

は異なった形状となっている。

図-4より直線回帰して得られる2つの母数を用いて、式(1)を x で一回微分することにより、図-5に示す確率密度関数が得られる。これによれば、母材が長くなるにしたがい、次のような傾向がみられる。CFRPは母材長 12.5mを除いて、分布のばらつきはあまり変わらずに引張耐力が小さくなる方向へ移動する。それに対し、AFRPでは母材長 25.0mを除いて、分布のばらつきが大きくなりながら、引張耐力が小さくなっていく。

式(1)を x について変形すれば式(3)となり、任意の破壊確率 $F(x)$ に対して引張耐力 x を求めることができる。

$$x = \alpha [-\ln (1 - F (x))]^{1/m} \quad (3)$$

標準引張試験と長さ効果引張試験の母材長 12.5m以上に対して、式(3)を用いて破壊確率 50% (F_{50}) と 0.135% ($F_{0.135}$) に対応する引張耐力 P_{50} 、 $P_{0.135}$ を算出し、母材長との関係を示したのが図-6である。ここで、 $F_{0.135}$ は JSCE-E131-1995(連続繊維補強材の品質規格(案))⁴⁾で規定される引張耐力の特性値の破壊確率である。

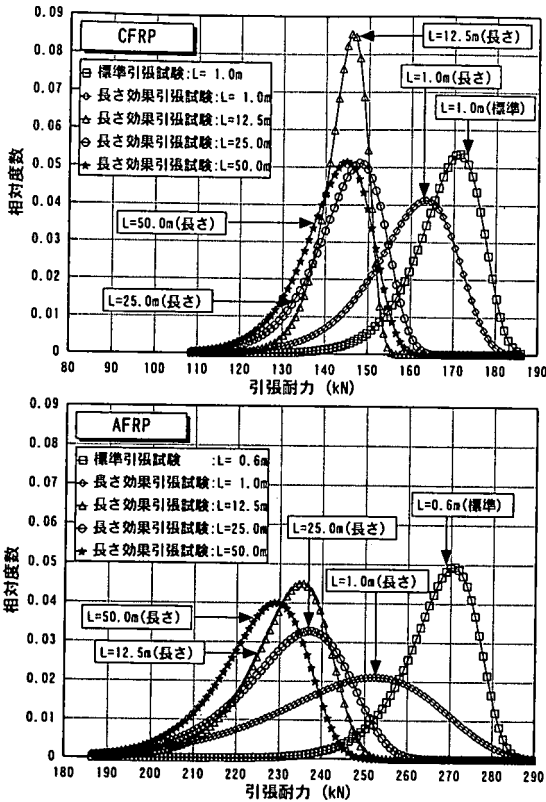


図-5 引張耐力の確率密度関数(実験結果)

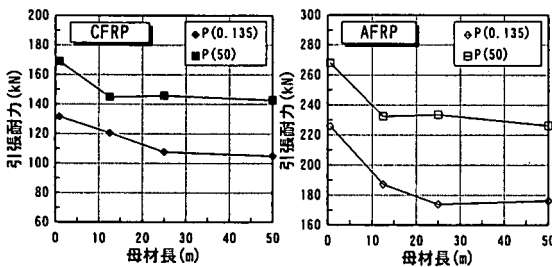


図-6 引張耐力と母材長

また、ワイブル分布の形状について検討するために、ワイブル確率紙から直線回帰して得られる形状母数(m)および尺度母数(α)が、母材長でどのように変化するか調べたのが表-3である。形状母数(m)はワイブル確率紙の直線勾配、すなわちばらつきを示すもので、小さいほどばらつきが大きくなる。そしてその大きさは、母材内に存在するき裂等の欠陥の進展に起因する破壊様式や供試体数などに依存することが知られている⁹⁾。ここで、尺度母数(α)と P_{50} および引張耐力の最頻値(確率密度関数の最大値を与える引張耐力)の三者は、数学的にはそれぞれ異なったものであるが、本実験結果では形状母数(m)が十分大きい場合ほとんど同じ値となり、これらは同一のものと見なせる。

表-3 引張耐力のワイブル母数

試験の種類	標準引張試験	長さ効果引張試験			
		L=12.5	L=25.0	L=50.0	
CF	m	25.0	34.1	20.6	20.3
	α (kN)	171.5	146.4	148.4	145.3
AF	m	36.4	28.8	21.2	25.0
	α (kN)	270.8	235.4	237.6	229.5

図-6と表-3によれば、CFRP、AFRPともに P_{50} や尺度母数(α)は母材が長くなるにしたがい減少し、最長50.0mでは標準引張試験結果に比べて15%低下する。また、 $P_{0.135}$ を同様に比較した場合、CFRPで20%、AFRPで22%の低下と、破壊確率によって引張耐力の低下率が異なる。これは、母材が長くなるにつれて形状母数(m)が小さく(すなわち、ワイブル分布のばらつきが大きくなる)ことによるものであるが、その低下率はCFRPよりAFRPの方が大きい。

(3) 終局ひずみ

終局ひずみの計測は、標準引張試験はひずみ計で、長さ効果引張試験ではL=12.5m以上に対してひずみ計と伸び計を併用して行った。なお、(2)引張耐力で示した標準引張試験は引張耐力のみに関する試験であるのに対し、ここに示す標準引張試験は引張耐力と終局ひずみの関係を調べる目的で行われた別のシリーズの実験⁹⁾で、母材長はCFRP、AFRPともに1.0mである。

長さ効果引張試験の終局ひずみ計測は、初期値の設定を次のような手順で行った。ひずみ計による計測は、載荷直前の母材自重が作用していない状態を初期値とした。また伸び計による計測では、図-7に母材長50.0mの荷重～伸び関係の測定結果の一例を示すが、両者の関係を完全弾性体として直線回帰し、原点を通過する直線に平行移動して伸びの初期値を補正し、引張耐力に相当する破壊時伸びを母材長で除して終局ひずみとした。

ここでは、まず両者の計測方法による違いについて考察し、次に寸法依存性について検討する。

a) 計測方法比較

終局ひずみを実験的に求める際、計測手法の関係から、ひずみ計による計測が一般に行われている。しかし筆者らの実験によれば、このようなひずみ計による計測では、母材の同一断面であってもひずみ計設置位置が断面方向に異なれば、計測結果は異なったものとなることが確認されている。すなわち、本研究で対象とした仕様の連続繊維緊張材では、母材の断面や長さ方向全域に渡って均一なひずみとならないこ

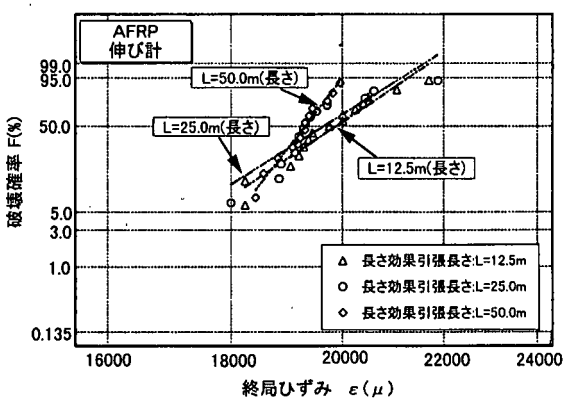
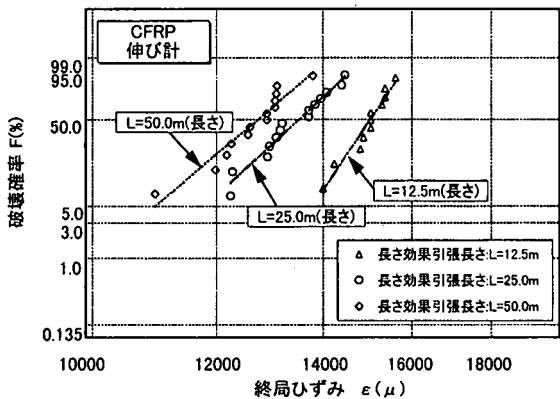
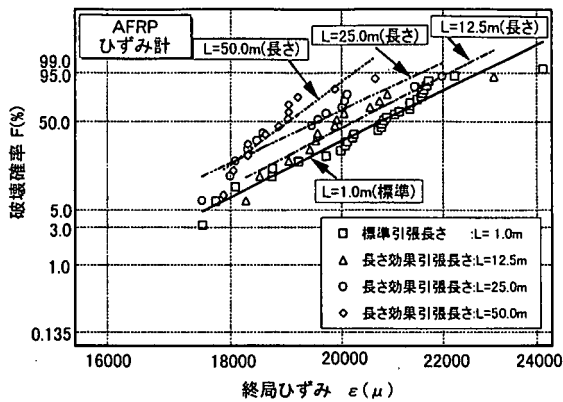
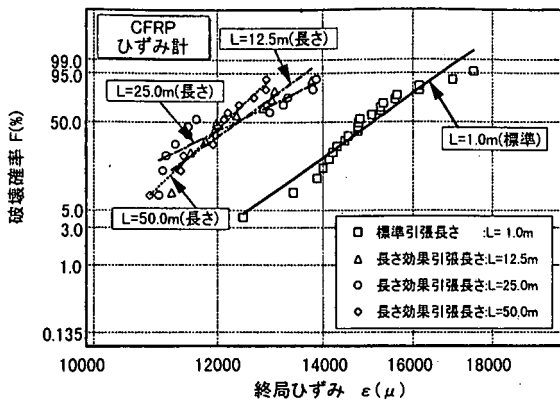


図-8 終局ひずみのワイブル確率紙へのプロット

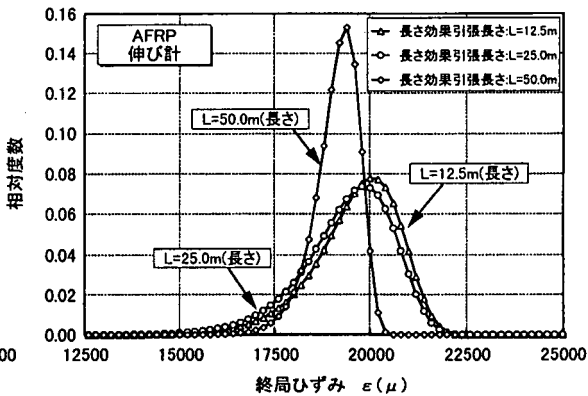
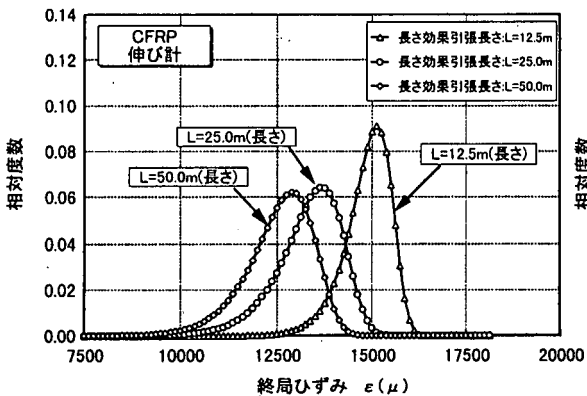
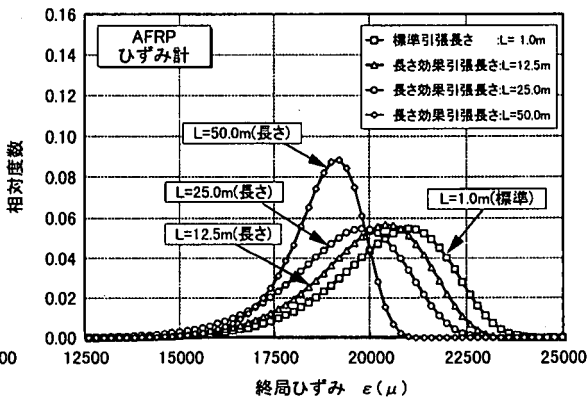
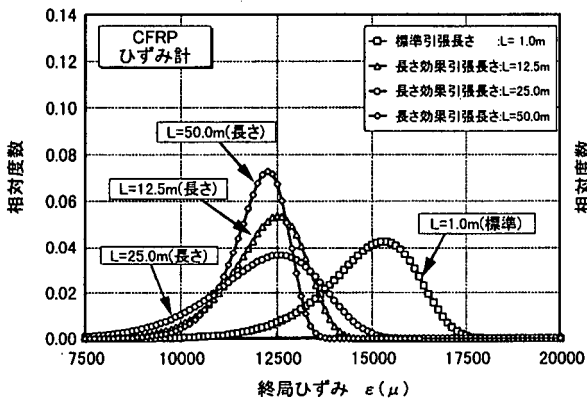


図-9 終局ひずみの確率密度関数

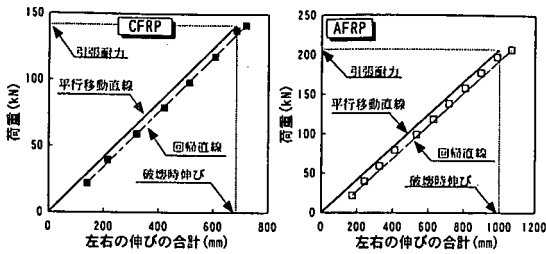


図-7 伸び計による終局ひずみの算出方法

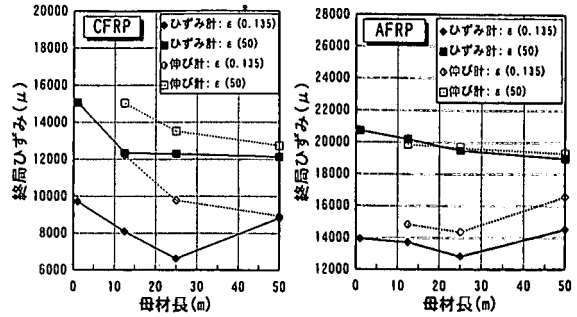


図-10 終局ひずみと母材長

表-4 終局ひずみの計測方法による比較 (単位: μ)

母材長 L(m)		12.5	25.0	50.0
CFRP	ひずみ計	12255	12188	12057
	伸び計	14967	13434	12649
	ひずみ/伸び	0.82	0.91	0.95
AFRP	ひずみ計	20050	19367	18890
	伸び計	19771	19531	19253
	ひずみ/伸び	1.01	0.99	0.98

表-5 終局ひずみのワイブル母数

試験の種類	標準引張試験	長さ効果引張試験				
		L=12.5	L=25.0	L=50.0		
ひずみ計	CF	<i>m</i>	14.3	14.8	10.1	19.6
	RP	$\alpha(\mu)$	15448	12652	12764	12356
	AF	<i>m</i>	15.8	16.2	14.9	23.3
	RP	$\alpha(\mu)$	21202	20657	20000	19288
伸び計	CF	<i>m</i>	—	30.2	19.2	17.6
	RP	$\alpha(\mu)$	—	15209	13773	13000
	AF	<i>m</i>	—	21.4	20.0	40.9
	RP	$\alpha(\mu)$	—	20217	20010	19485

とが判明している。一方、母材全体としての伸びに着目して終局ひずみを計測する手法が考えられるが、通常の引張試験では母材が短いために十分な精度が得られず、現実的でない。しかし、長さ効果引張試験では母材が十分に長いことから、図-11に示した計測方法で、母材全体としての伸びの計測が十分な精度で可能となる。そこで、一般に行われているひずみ計による終局ひずみと、伸び計によるそれを比較検討する。

表-4は、各供試体で得られた終局ひずみを平均し、各母材長ごとに示したものである。ひずみ計は供試体一体につき4箇所設置されているが、それらの結果を単純平均して、供試体一体の結果とした。

これによれば、母材形状がより線状のCFRPは、組み紐状のAFRPに比べて計測手法による差が大きく、母材が長くなるにつれて両者の計測結果の差が小さくなる傾向にある。したがって、連続繊維緊張材の終局ひずみを実験的に求める場合は、計測方法によって異なる結果となるため、注意する必要がある。

b) 終局ひずみ

ひずみ計および伸び計で計測された終局ひずみを、ワイブル確率紙へプロットした結果を図-8に示すが、CFRP、AFRPともに計測方法によらず、引張耐力と同様に各母材長ともに、ワイブル分布への適合性がよいことがわかる。

次に、引張耐力と同様に確率密度関数に式(1)を適用し、終局ひずみの確率密度関数を示したのが図-9である。いずれの分布形状も、母材が長くなるにしたがい、ばらつきが小さくなりながら、最頻値が減

少してゆくのがみられる。この傾向は、L=25.0mまでは母材長に必ずしも比例するとはいえないが、L=50.0mでは顕著に表れている。また、計測方法によっても終局ひずみの分布形状が異なる。

確率密度関数を分析するために、式(3)を用いて破壊確率 $F_{50}, F_{0.135}$ それぞれに対応する終局ひずみ $\epsilon_{50}, \epsilon_{0.135}$ を各母材長ごとに求めたものが図-10、ワイブル母数を示したものが表-5である。これらによれば、母材が長くなるにしたがい次のことが言える。CFRP、AFRPともに ϵ_{50} や尺度母数(α)は最弱リンクにしたがって減少する。標準引張試験と長さ効果引張試験 L=50.0mを比較した場合、CFRPの減少率はひずみ計で20%、伸び計で15%、AFRPのそれは両計測結果ともに9%である。また、ばらつきを表す形状母数(*m*)は、CFRP、AFRPともに増加する傾向が認められ、その結果 $\epsilon_{0.135}$ は、CFRPでは減少傾向があるのに対し、AFRPでは漸増する傾向にある。

(4) 引張剛性

各母材ごとに破壊時の引張剛性の平均値および通常の3σ法で求めた上限値、下限値と母材長との関係を図-11に示す。引張剛性は、引張耐力を終局ひずみで除して算出したものであるが、その大ききやそのばらつきは母材長の影響をあまり受けていない。

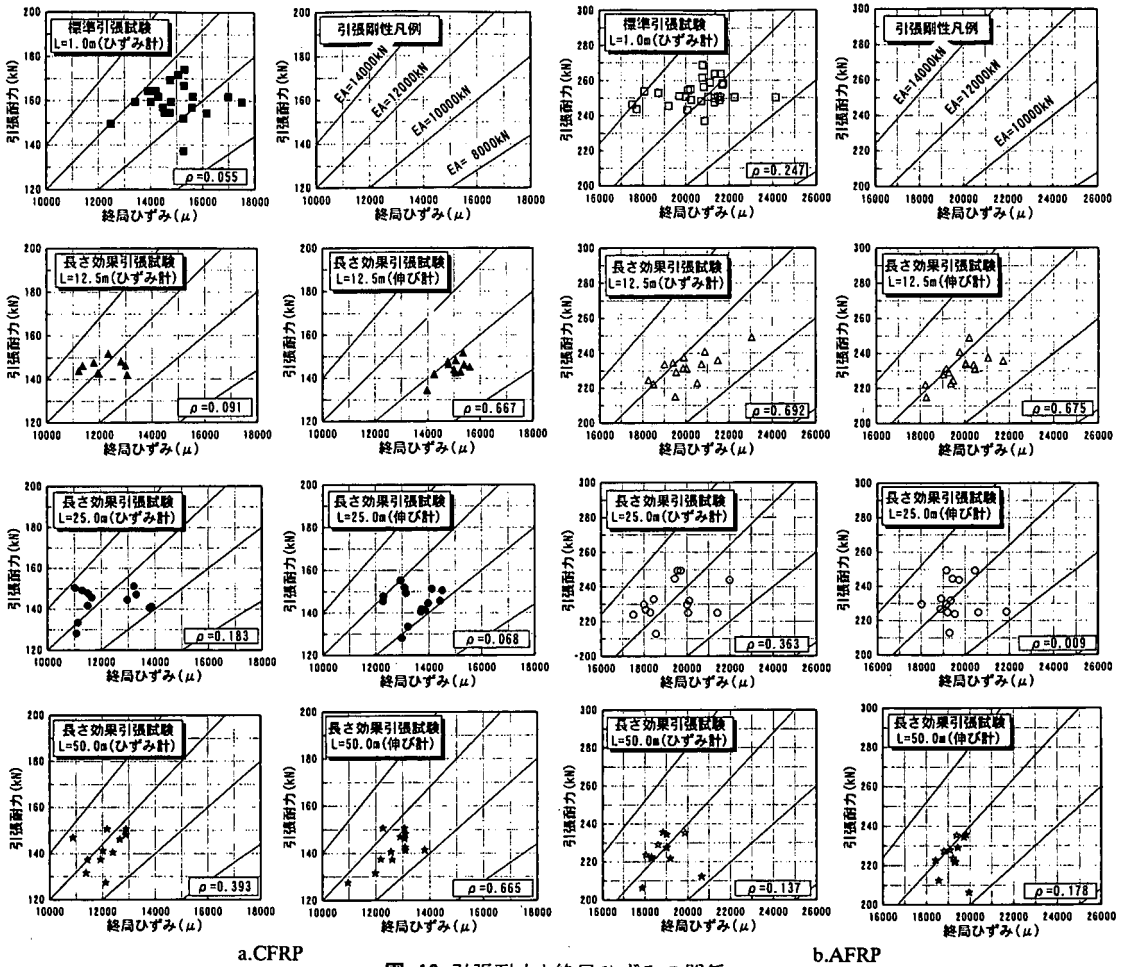


図-12 引張耐力と終局ひずみの関係

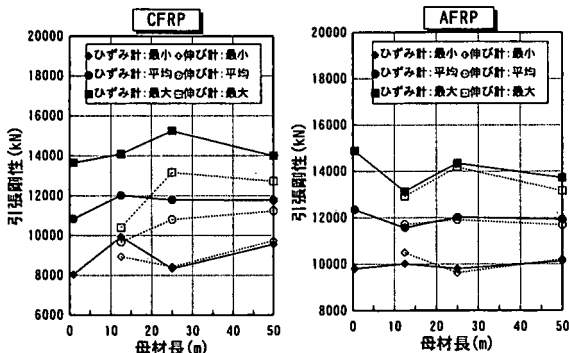


図-11 母材長と引張剛性

引張耐力と終局ひずみの関係を、図-12に示す。図中、原点を通る引張剛性の目盛りおよび引張耐力と終局ひずみの相関係数(ρ)を併記したが、ほとんどの結果で両者には相関があまり見られない。

4. 引張耐力の寸法依存性に関する解析的検討

本研究で示したような長さ効果引張試験は、一般の設備では実施が困難であることから、母材長による寸法効果の影響を実験的に検討するのはかなり難しいと考えられる。そこで、数値解析により母材長に関する寸法効果の影響を把握し、実験結果と比較検討する。

(1) 解析モデル

標準引張試験による長さ l の供試体を標準供試体とし、長さ効果引張試験の供試体は、標準供試体が図-13に示すように n 本直列に連なった直列システムで構成されるものとする。これは、一つの標準供試体の破壊がシステム全体の破壊につながるため、長さ効果引張試験の供試体の引張耐力を、最弱リンクモデルで表現したものである。

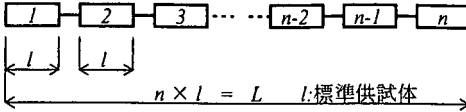


図-13 直列システム

(2) 解析方法

ここで、標準供試体の引張耐力の分布は同一であると仮定すれば、長さ効果引張試験の供試体の破壊確率密度関数 $f(x)$ は、標準引張試験の供試体の破壊確率密度関数 $f_s(x)$ を用いて、式(4)で表すことができる。

$$f(x) = n \cdot f_s(x) \cdot \{1 - F_s(x)\}^{n-1} \quad (4)$$

ここに、 $F_s(x)$ は $f_s(x)$ の積分値 (区間: $-\infty \rightarrow x$) したがって、破壊確率分布関数 $F(x)$ は、破壊確率密度関数 $f(x)$ を、区間 $-\infty \rightarrow x$ で積分することにより、式(5)で与えられる。

$$F(x) = \int_{-\infty}^x f(x) dx = 1 - \{1 - F_s(x)\}^n \quad (5)$$

式(5)の $F_s(x)$ に式(1)を代入して整理すれば、式(6)が得られる。

$$F(x) = 1 - \exp\{-n \cdot (x/\alpha)^m\} \quad (6)$$

式(1)と式(6)を比較すれば、長さ効果引張試験の供試体の引張耐力もワイブル分布に従い、母材長が引張耐力に与える影響は、 n を用いて表すことができる。また、式(6)を x について整理すれば式(7)となり、破壊確率 $F(x)$ を定義すれば、破壊荷重 x を直接求めることができる。

$$x = \alpha \cdot [-\ln\{1 - F(x)\}/n]^{1/m} \\ = (1/n)^{1/m} \cdot \alpha \cdot [-\ln\{1 - F(x)\}]^{1/m} \quad (7)$$

式(7)は、式(3)に $(1/n)^{1/m}$ を乗じた形となっており、母材が長くなるにつれて、尺度母数 (α) が $(1/n)^{1/m}$ に比例して小さくなる。ただし、パラメータ α および m は、標準引張試験で得られた値である。

(3) 解析結果

解析で得られた確率密度関数を、標準引張試験結果とあわせて図-14に示す。実験結果の図-5と比較すれば、母材長によっては分布形状の異なるものもあるが、解析結果は実験結果をおおむね反映しているものと考えられる。

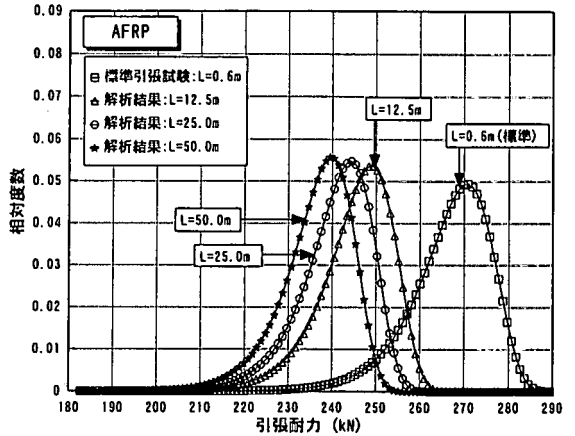
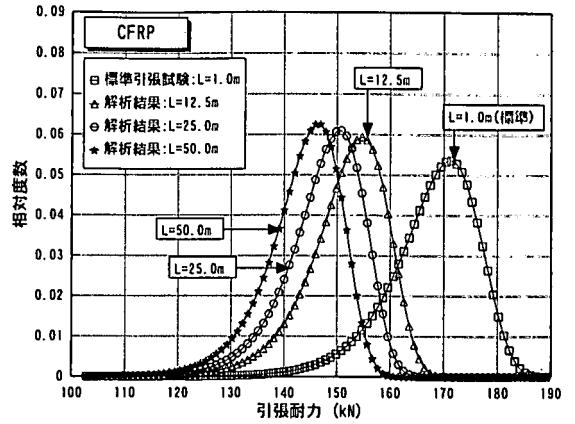


図-14 引張耐力の確率密度関数(解析値)

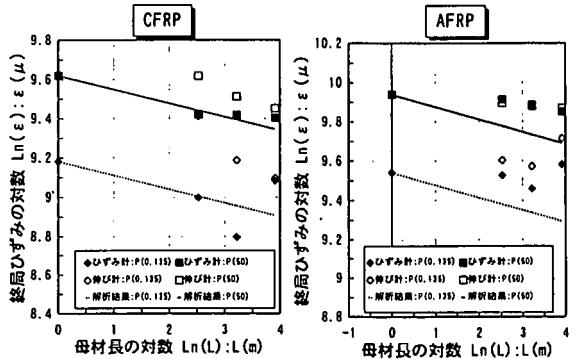


図-15 実験値と解析値の比較

式(7)によれば、 $F(x)$ が一定の場合、引張耐力 x と母材長 n は対数軸上で逆比例の関係にある。 $P_{0.115}$ と P_{10} について、実験結果と解析結果を両対数軸で比較したものを図-15に、引張耐力の比較を表-6に示す。これらによれば、 P_{10} では比較的解析精度が良く、長さに関する寸法依存性は解析的にも推定可能と推察される。しかし、 $P_{0.115}$ においては誤差が大きく、かつ全体的に解析結果の方が大きな引張耐力を示す傾向が認められる。これは、解析では形状母数 (m) は母材長

表-6 引張耐力解析結果 (単位:kN)

母材長 L(m)		12.5	25.0	50.0	
C	標準供試体数 <i>n</i>	12.5	25	50	
F	P _{0.135}	解析	119.0	115.7	112.6
		実験	120.6	107.7	105.0
		解析/実験	0.99	1.07	1.07
R	P ₅₀	解析	152.8	148.6	144.6
		実験	144.8	145.8	142.6
		解析/実験	1.06	1.02	1.01
A	標準供試体数 <i>n</i>	20.8	41.7	83.3	
F	P _{0.135}	解析	207.7	203.8	199.9
		実験	187.1	174.0	176.2
		解析/実験	1.11	1.17	1.13
R	P ₅₀	解析	246.6	241.9	237.4
		実験	232.4	233.5	226.1
		解析/実験	1.06	1.04	1.05

にかかわらず一定値と仮定しているのに対し、実験結果では表-3に示すように母材が長くなるにしたがい小さくなる傾向があるためである。特に破壊確率の小さな域における引張耐力は、形状母数(*m*)に敏感であることから、P_{0.135} においては誤差が大きくなっている。したがって、引張耐力の特性値における寸法効果の影響は、以下に示すような事項に着目してさらに詳細に検討する必要があると考えられる。

・本論文では全データに対して適合性のよい一種類の確率密度関数を与えているが、低引張耐力側裾野付近への適合性は十分検討されていない。一般に問題となるのは破壊確率の小さな域の分布特性であることから別な手法での検討が必要である。

・長さ効果引張試験では、供試体数をさらに増加させて、ワイブル母数の推定精度を向上させる必要がある。

5. 結論

本研究で用いた連続繊維緊張材の、母材長が引張特性に与える影響をまとめれば、以下のようである。

- 1) 引張耐力および終局ひずみとともに、ワイブル分布への適合が良好であるが、その分布形状は母材長によってそれぞれ異なる。
- 2) 引張耐力は、母材が長くなるにしたがい小さくなる。母材長 50.0m と標準供試体を破壊確率 50 % で比較した場合、引張耐力は CFRP, AFRP ともに約 15 % 減少する。
- 3) ひずみゲージで得られた終局ひずみを同様に比較した場合、CFRP では 19 %, AFRP では 9 % 小さくなる。

- 4) 引張耐力および終局ひずみとともに、母材が長くなるにしたがいワイブル分布パラメータである形状母数、尺度母数ともに小さくなる。
- 5) 母材長を考慮した引張耐力は、標準供試体の引張耐力の分布をもとにして、最弱リンクモデルを用いて解析的に推定可能である。
- 6) 引張剛性は、母材長の影響をあまり受けない。

連続繊維緊張材は炭素系、アラミド系あわせて数種類のもので製造されているが、いずれの製品も本研究で対象とした供試体と同様に連続繊維と繊維結合材から成る複合材料であり、その引張特性は脆性的であることが知られている。したがって、このような材料の引張耐力は、本解析で示したように最弱リンク概念に従った寸法効果を有すると考えられる。プレストレストコンクリート橋梁で多く用いられる外ケーブルのような付着のない緊張材、斜張橋や吊り橋などのケーブルなどに連続繊維緊張材を適用する場合には、引張耐力の特性値を設定するにあたり、寸法効果の影響を適切に考慮する必要があると考えられる。

謝辞：本研究は、阪神高速道路公団「コンクリー構造物の耐久性に関する調査研究委員会」の研究業務の一貫で行われたものであり、同委員会委員各位には多大なご指導をいただいた。また、榎本剛氏(東京製綱(株))ならびに白濱昭二氏(神鋼鋼線工業(株))にも実験に多大な協力をいただいた。ここに記して謹んで謝辞を表します。

参考文献

- 1) 例えば、谷口裕史, 陸好宏史, 喜多達夫, 町田篤彦: ロープ系連続繊維補強材を外ケーブル緊張材に用いたPC部材の曲げ性状に関する研究, 土木学会論文集, No.544 / V-32, pp.167-175, 1996.8.
- 2) 日本材料学会編: 先端材料シリーズ 破壊と材料, 裳華房, 1994.9.
- 3) 材料強度学, 横堀武夫, 岩波全書, 1994.4.
- 4) 土木学会: 連続繊維補強材を用いたコンクリート構造物の設計・施工指針(案), コンクリートライブラリー, 第88号, 1996.9.
- 5) 連続繊維補強コンクリート編集委員会編: 連続繊維補強コンクリート, 技報堂出版, 1995.7.
- 6) 斉藤秀夫, 伊藤良二, 濱田譲, 酒井博士: 連続繊維緊張材の引張強度に関する研究, 第6回プレストレストコンクリートの発展に関するシンポジウム, pp.593-598, 1996.
- 7) 中田順憲, 山名宗之, 服部篤史, 真嶋光保: 偏向部を有する連続繊維マルチ緊張材の引張強度特性に関する実験的検討, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.18,

No.1, pp.1173-1178, 1996.

8)酒井博士, 足立幸郎, 真嶋光保, 宮川豊章:連続繊維緊張材を用いた大容量マルチ定着システムの引張強度特性に関する実験的検討, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.18, No.1, pp.1191-1196, 1996.

9)材料強度確率モデル研究会編:材料強度の統計的性質, 養賢堂,1992.

(1999.6.9受付)

SIZE EFFECT OF FRP TENDONS ON TENSILE PROPERTIES

Hiroshi SAKAI , Yuzuru HAMADA,
Mitsuhiro HAYASHIDA , Atushi HATTORI and Toyoaki MIYAGAWA

It is known that tensile strength of the brittle materials like FRP tendons has wider dispersion , and depends more significantly on size compared with the ductile materials. However, only few reports have been published.

This paper discusses the influence of specimen length on tensile properties of FRP tendons to make size effect clear. The main experimental factor of the tension tests, specimen length, was decided taking standard testing method, actual prestressed concrete structures and so on into account. It was made clear that the longer specimens had smaller tensile strength and ultimate strain.